

**Blade sweep applied to axial flow fan rotors of  
controlled vortex design**

**Lapátnyilazás alkalmazása sugár mentén  
növekvő lapátcirkulációra tervezett axiális  
átömlésű ventilátor-járókerekekre**

**MTA doktori értekezés tézislevele**

**Készítette:**

**Dr. Vad János**

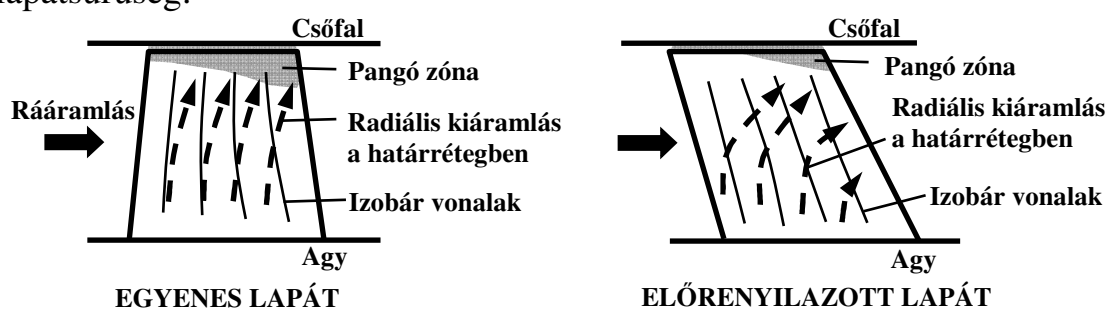
**Budapest, 2011. szeptember**

dc\_242\_11

## 1. Bevezetés, célkitűzés

Az axiális átömlésű ventilátorokat széles körben és nagy számban alkalmazzák többek között a levegőkezelésben és az ipari légtechnikában. A felhasználói igény a mai napig ösztönzi a nemzetközi áramlástechnikai szakmát az axiálventilátor-járókerek tervezési módszereinek továbbfejlesztésére annak érdekében, hogy a tervezett üzemállapot a lehető legpontosabban és a lehető legjobb hatásfokkal valósuljon meg. A tervezés továbbfejlesztésében kulcsszerepet játszik a járókerék-lapátcsatornában kialakuló háromdimenziós (3D) áramlás megismerése. A járókerék alapvető tervezési jellemzői közé tartozik a *lapát-felfűzési vonal alakja* és a *lapátcirkuláció sugár menti eloszlása*, amelyek kihatnak a 3D lapátcsatorna-áramlásra. E két tervezési jellemző hatását a szakirodalom általában *egymástól függetlenül* tárgyalja. Az *együttes* hatásukra vonatkozó ismeretek bővítését fogalmaztam meg kutatási célként.

A 3D lapátcsatorna-áramlás jellegzetessége a közeg sugár irányú mozgása a lapátcsúcs felé – a továbbiakban: *radiális kiáramlás* – a járókerék-lapátok szívott oldali határrétegében. A sugár mentén kifelé vándorló határréteg-közeg felgyülemlik a lapátcsúcs közelében (1. ábra). Ezáltal a külső gyűrűfal (csőfal) közelében fokozódik az össznyomás-veszteség, megnő a külső gyűrűfali határréteg kiszorító hatása, és a lapátcsúcs közelében az áramlás hajlamossá válik a leválásra. A radiális kiáramlást a szakirodalom a „*kicentrifugálódás*” [I-II] leegyszerűsített modelljével szemlélteti. Eszerint a határrétegben a centrifugális erő nagyobb, mint a sugár irányú nyomásgradiens hatásából adódó erő [III]. A *külső gyűrűfali kiszorító hatást*, amely a csőfali határréteg axiális sebességmegoszlásából számított *axiális kiszorítási vastagsággal* jellemezhető, az irodalom [IV-V] szerint a következők befolyásolják: a belépő határréteg tulajdonságai, légrésméret, lapátprofil, lapátterhelés, lapátbeállítási szög, lapátsűrűség.



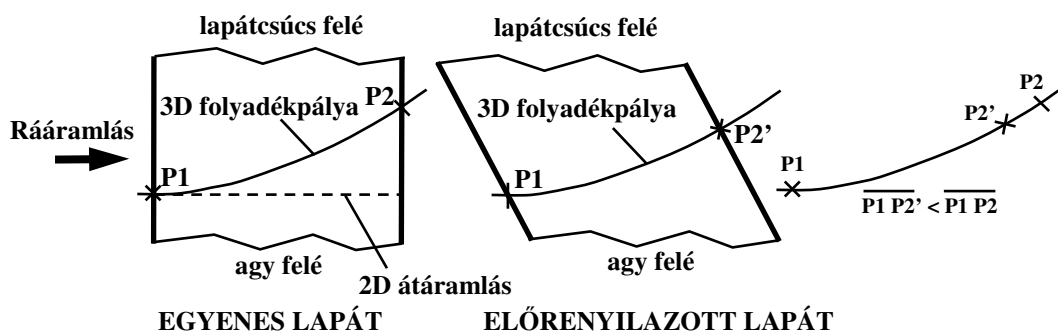
**1. ábra.** Egyenes és előrenyilazott lapátok: a szívott oldal jellegzetességei

A gyakorlat igazolja, hogy a radiális kiáramlás és annak nemkívánatos hatásai mérsékelhetőek a lapátozás előrenyilazásával (1. ábra). A *lapát-felfűzési vonal* a lapát hengermeteszeteinek súlypontjait összekötő vonal. Míg az *egyenes lapát* sugár irányú egyenes felfűzési vonallal készül (*radiális lapát-felfűzés*), lapátnyilazás során a kiindulási egyenes lapát hengermeteszeteit a húrjukkal párhuzamosan eltoljuk. A *lapátnyilazási szög* a felfűzési vonal és a radiális irány

által bezárt szög. *Előrenyilazás* esetén adott sugáron lévő lapátmetszet a rááramlási iránnyal szemben előretolva, előrébb helyezkedik el, mint a kisebb sugáron lévő szomszédos lapátmetszet. Az előrenyilazás radiális kiáramlást mérséklő hatását a szakirodalom a következő intuitív, szavakban megfogalmazott modellel indokolja [II, VI] (1. ábra): az előrenyilazás folytán a szívott oldali határréteg lassuló zónájában az izobár vonalak – követve a lapát-felfűzési vonal irányát – előrehajlanak, miáltal pótlólagos radiális nyomásgradiens jelenik meg gátolva a radiális kiáramlást.

A lapátozások klasszikus „*állandó cirkulációra*” tervezése során sugár mentén állandó lapátcirkulációt írunk elő. Ezzel szemben a „*növekvő cirkulációra*” tervezés szerint a tervezésben előírt lapátcirkuláció a sugár mentén növekszik. A cirkuláció sugár menti változékonyságát a  $d\psi_{2,D}/dR$  derivált jellemzi.  $\psi_{2,D}$  a dimenziótlanított tervezési ideális össznyomás-növekedés adott sugáron,  $R$  a lapátcsúcs-sugárral dimenziótlanított sugár. A „*növekvő cirkulációra*” tervezés ( $d\psi_{2,D}/dR > 0$ ) számos gyakorlati előnnyel bír, pl. fokozott fajlagos teljesítményű, egyszerű geometriájú lapátozások valósíthatóak meg általa. Tervezési komplikációt okoz azonban, hogy a sugár mentén növekvő lapátcirkulációnak megfelelően a lapátról örvények úsznak le. Ezek hatására a szívott valamint nyomott oldalon rendre radiális ki- valamint beáramlás jellemző, miáltal a teljes lapátcsatornát jellegzetes 3D áramkép uralja [I].

A szakirodalmi ismeretek [VII-IX] kiegészítést igényelnek a sugár mentén változó lapátcirkuláció és az előrenyilazás együttes, 3D lapátcsatorna-áramlást befolyásoló hatásainak tekintetében. E 3D hatásokra mutat példát a 2. ábra. Az egyenes lapát klasszikus értelemben vett húr hosszát hengermetszeten értelmezzük, annak megfelelően, hogy az idealizált áramlás, a radiális sebességkomponens elhanyagolása révén, kétdimenziós (2D). A „*növekvő cirkulációra*” tervezés hatására a szívott oldali határrétegben a radiális kiáramlás fokozódik. Az intenzív radiális kiáramlás közbejöttével a lapát 3D folyadékpályák által súrolt hossza ( $\overline{P1 P2}$ ) megnő, ami az *effektív lapáthúrhossz* növekedéseként fogható fel [X]. Előrenyilazással a 3D pályák csonkíthatóak ( $\overline{P1 P2'} < \overline{P1 P2}$ ), miáltal az effektív lapáthúrhossz csökkenthető.



**2. ábra.** A szívott oldalon a radiális kiáramlás az effektív húrhosszat növeli a 2D húrhosszhoz képest. Előrenyilazással az effektív húrhossz csökkenthető.

A lassító lapátrácsok tervezésében lényeges támpontokat szolgáltat a diffúzoros áramlások vizsgálata, különös tekintettel a falsúrlódás és az áramlás irányú nyomásgradiens határrétegre gyakorolt együttes hatására. A szakirodalom a diffúzoros áramlások egyes konfigurációit elkülönítve tárgyalja, úgymint kvázi-egydimenziós (Q1D) áramlás kúpdfúzorokban [XI]; 2D áramlás sík lapátrácsokban, pl. a [III, VIII] szakkönyvekben hivatkozott, Lieblein-féle tanulmányok; 3D áramlás járókerék-lapát körrácsokban [VIII, X, XII].

A „növekvő cirkulációra” történő előtervezésben hagyományosan kvázi-kétdimenziós (Q2D) szemléletet alkalmaznak a radiális sebességkomponens elhanyagolásával [III, VIII, XIII]. A fejlettebb, kvázi-háromdimenziós (Q3D) szemléletet tekinti át a [III] szakkönyv. A Q3D szemlélet, numerikus áramlástani (Computational Fluid Dynamics, CFD) igénye folytán, túlmutat az egyszerű előtervezési fázison. A Q2D forgógép-előtervezés számos esetben klasszikus sík lapátrács-mérési eredményeken alapul [XIV-XV], és célja többek között az optimális lapátsűrűség meghatározása [XIV]. A szakirodalomban uralkodó nézet szerint a lapátnyilazás módja és mértéke az előtervezés bemenő adata, vagyis a tervező által előírt jellemző. A kedvező felfűzési vonalgeometriát különféle, önkényesen előírt felfűzési vonalú járókerék-változatok összehasonlító vizsgálata révén kutatják fel [II, VI, IX].

Az értekezés célkitűzései axiálventilátor-járókerek lapátozására vonatkozóan:

- A „növekvő cirkulációra” tervezésre, az előrenyilazásra és e kettő kombinációjára vonatkozó kvalitatív áramlástechnikai ismeretek bővítése;
- Az új ismeretek alapján a „növekvő cirkulációra” történő előtervezésben hasznosítható számszerűsített új irányelvek, módszerek kidolgozása, különös tekintettel az előrenyilazás célirányos alkalmazására.

## 2. Munkamódszerek

**1.-3. tézispontok.** Analitikus modellt dolgoztam ki a járókerék-lapát szívott oldali határrétegében fellépő radiális kiáramlás vizsgálatára [1]. Kijelöltem adott sugáron egy-egy szomszédos pontot a lapát szívott oldali határrétegében és a határrétegen kívül a főáramlásban, a lapátozással együttforgó rendszerben. E pontokban rendre a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes (RANS) egyenlet és az Euler-egyenlet sugár irányú komponens egyenletét írtam fel, és képeztem ezek különbségét. A különbségben megjelent a határrétegen belüli és azon kívüli nyomásgradiensek sugár irányú összetevőjének különbsége. Ezt a tagot a RANS egyenlet lapátfelületre merőleges komponens egyenletének felhasználásával közelítettem. A végeredményül kapott egyenlet alapján megvizsgáltam, mely hatások befolyásolják a szívott oldali határréteg közegének radiális kiáramlását a főáramláshoz képest. Az egyes hatások mértékét 3D lézer Doppler anemometriai méréseim [2] alapján számszerűsítettem. E méréseket használtam fel a kapcsolódó áramlás-finomszerkezeti [3] és gyűrűfali határréteg-kiszorítási tanulmányokban is.

**4.-6. tézispontok.** Kúpdiffúzorokra (Q1D áramlás) származtattam a falhossztól (kúpalkotó-hossztól) függő össznyomás-veszteségi tényező diagramjait különféle keresztmetszetviszonyokra, a szakirodalom feldolgozásával. A Lieblein által tárgyalt rácsmérések (2D áramlás) adatainak felhasználásával is hasonló jellegű diagramokat szerkesztettem, amelyek a veszteségtényezőt a lapátsűrűség függvényében ábrázolják többféle áramlási szögre. Utóbbi diagramokon mutattam ki esettanulmányban az effektív lapáthúrhossz előrenyilazás általi csökkentésének veszteség-mérséklő hatását. E kedvező hatás felkutatására korábban CFD-vel támogatott előtanulmányokat végeztem [4]. Az eredmények igazolására a forgógépek 3D lapátcsatorna-áramlásának szakirodalmi ismereteit is beépítettem.

**7. tézispont.** Az előtervezési módszer kidolgozásához az axiális lapátrács-tervezés alapösszefüggéseiből indultam ki. A módszer kidolgozását mérésekkel és elméleti tanulmányokkal alapoztam meg [2, 5-15].

Az eredmények megerősítésére elvégeztem a szakirodalom eddiginél részletesebb, szélesebb körű elemzését [15]. A **3., 5., 6. és 7. tézispontokat** Corsini és Rispoli numerikus áramlástanú munkásságát [I][5-6, 8, 10, 12-13] felhasználó tanulmányokkal támasztottam alá.

### 3. Új tudományos eredmények

**1. tézispont** [16]. Analitikus modellt dolgoztam ki a járókerék-lapát szívott oldali határrétegében fellépő radiális kiáramlást befolyásoló hatások tanulmányozására. A modell alkalmazásával elvégeztem e hatások eddigieknél részletesebb, rendszerezett vizsgálatát, amely meghaladja a „kicentrifugálódás” szakirodalomban hivatkozott szemléletét.

A kiáramlást befolyásoló hatások mértékének jellemzésére  $\mu_i^*$  radiális áramlási paramétereket vezettem be. Mérési adatok feldolgozásával jellemző  $\mu_i^*$  számértékeket állapítottam meg, amelyek kiértékelését kiegészítettem az áramlás mért finomszerkezetének elemzésével. A vizsgálatok alapján a „növekvő cirkulációra” tervezésre vonatkozó ismereteket a következő megállapítással bővítettem: a „növekvő cirkulációra” tervezett lapátozások az „állandó cirkulációra” tervezett gépekhez képest fokozottan hajlamosak a szívott oldali határréteg-közeg radiális kiáramlására és lapátcsúcs-közeli felgyülemlésre, a sugár mentén növekvő lapátcirkuláció miatt a lapátról leúszó örvények hatására.

**2. tézispont** [16]. Kimutattam, hogy a szívott oldali lapát-határrétegben a radiális kiáramlás és ennek révén a külső gyűrűfali kiszorító hatás fokozódik azon örvények erősségének növekedésével, amelyek a „növekvő cirkulációra” tervezés hatására a lapátról leúsznak. A leúszó örvények erősségét a lapátcirkuláció sugár menti változásának rohamossága határozza meg. Ennek megfelelően az új  $d\psi_{2,D}/dR$  jellemzővel egészítettem ki azon paraméterek

csoportját, amelyek a szakirodalom szerint a kiszorító hatást befolyásolják. Mérések alapján számszerűsítettem a következő, előtervezésben felhasználható közelítő összefüggést: egyenes lapátok esetén a külső gyűrűfalnál az axiális kiszorítási vastagság „növekvő cirkulációra” tervezés miatti növekménye arányos  $d\hat{\psi}_{2,D}/dR$ -rel.

**3. tézispont** [15-16]. Igazoltam, hogy a szívott oldali határréteg közegének radiális kiáramlása mérsékelhető a lapát előrenyilazásával. Erre az eredményre az 1. tézispontban tárgyalt analitikus modell módszeres alkalmazásával jutottam, túlmutatva a szakirodalomban szereplő intuitív, szavakban megfogalmazott modellen. Figyelembe véve, hogy az 1. és 2. tézispontok szerint a „növekvő cirkulációra” tervezésnek tulajdoníthatóan a radiális kiáramlás fokozódik, a következő megállapítást tettem: az előrenyilazás lapátcsúcs-közeli veszteséget mérséklő hatása a „növekvő cirkulációra” tervezett gépek esetén fokozottan kiaknázható az „állandó cirkulációra” tervezett gépekhez képest. Ez a megállapítás kiegészíti a „növekvő cirkulációra” tervezéssel kapcsolatos szakirodalmi ismereteket.

**4. tézispont** [17]. Különféle bonyolultsági szintű diffúzoros áramlások eddigieknél átfogóbb összegző vizsgálatát végeztem el, a szakirodalmi adatok és ismeretek pótlólagos feldolgozása, értékelése révén. Vizsgálataim Q1D (kúpdiffúzor), 2D (sík lapátrács) és 3D (forgógép-lapátozás körrács) áramlási esetekre terjedtek ki. Az egyes összehasonlító esettanulmányokban rögzítettem a diffúzorba belépés valamint az abból történő kilépés geometriai és sebességi körülményeit. A következőt állapítottam meg: a fal menti folyadékpályák rövidülésének következménye az össznyomás-veszteség csökkenése a falsúrlódás hatásának mérséklődése által, amennyiben az áramlás irányú nyomásgradiens egy kritikus érték alatt marad.

**5. tézispont** [17]. Újraértelmeztem a Lieblein által végzett, sík lapátrácsokra vonatkozó tanulmányok eredményeit. Ennek alapján közelítő módszert dolgoztam ki forgógép-lapátrácsokban fellépő össznyomás-veszteség számítására. A módszerrel becsülhető a veszteség megváltozása, amennyiben a lapát menti folyadékpályák hossza módosul. A módszer az előtervezés során lehetővé teszi annak becslését, hogy milyen lapátsűrűség-tartományban és milyen mértékben várható veszteség-csökkenés a folyadékpályák rövidítésétől – vagyis az effektív lapáthúrhossz csökkentésétől –, előírt be- és kilépő áramlási szögek és rögzített lapátosztás esetén.

**6. tézispont** [15, 17]. Rámutattam, hogy az egyenes lapátokra alkalmazott „növekvő cirkulációra” tervezésnek tulajdoníthatóan – összehasonlítva az „állandó cirkulációra” tervezéssel – pótlólagos össznyomás-veszteség megjelenése várható a gyűrűfalaktól távolabb. Ennek oka a lapát szívott oldala menti folyadékpályák hosszabbodása és ez által a falsúrlódás hatásának fokozódása a felerősödött radiális kiáramlás miatt. Megállapítottam, hogy ez a

hatás mérsékelhető, ha a be- és kilépő sebességi viszonyok megtartása mellett a lapátot előrenyilazzuk, ugyanis ennek révén a szívott oldali folyadékpályák rövidülnek. Ennek alapján rámutattam, hogy az előrenyilazás *gyűrűfalaktól távolabbi* veszteséget mérséklő hatása „növekvő cirkulációra” tervezett gépek esetén fokozottan kiaknázható az „állandó cirkulációra” tervezett gépekhez képest. Ez a megállapítás kiegészítést ad a 3. tézisponthoz, amely szintén a „növekvő cirkulációjú” lapátozás előrenyilazásának kedvező hatását taglalja, de csak a *külső gyűrűfal-közeli* veszteség csökkentése szempontjából.

**7. tézispont** [8-15]. Kidolgoztam egy új “növekvő cirkulációra” történő előtervezési módszert, amely magába foglalja a lapátozás előrenyilazását. Az új módszer a hagyományos Q2D „növekvő cirkulációra” tervezés kiegészítése. Lehetővé teszi az áramlási jellemzők pontosabb figyelembevételét a szívott oldali 3D folyadékpályák mentén, ahol a gyűrűfalaktól távolabbi veszteség túlnyomó része keletkezik. Ezt a Q2D és Q3D tervezési szemléletmódok kombinációjaként éri el. Az új módszer alapgondolata: az optimális lapátsűrűségek meghatározása külön-külön a Q2D és Q3D szemléletmódokban, majd azok egyidejű megvalósítása egyetlen, előrenyilazott lapátgeometriában. A szakirodalomban uralkodó nézet szerint a lapátnyilazási szög az előtervezés *bemenő adata*, vagyis a tervező által *előírt* jellemző. Ezzel szemben az új módszer az előrenyilazási szög sugár menti eloszlását *kimenő adatként* szolgáltatja, vagyis a lapát-felfűzési vonal aerodinamikailag kedvezőnek ítélt alakja az előtervezés *eredménye*. Vizsgálatom szerint az új módszerrel történő előtervezés az összhatásfok néhány százalékos javulását eredményezheti.

#### **4. Az eredmények hasznosítása, további feladatok**

A dolgozatban bemutatott eredmények a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszékének alapkutatási és alkalmazott kutatás-fejlesztési projektjei keretében születtek. A tézispontokhoz kötődő axiális forgógép-tervezési, konstrukciós, CFD, mérési és üzemeltetési tapasztalatokat a Tanszék a légtechnikai ipar valamint a végfelhasználók számára végzett tervezési, szakértői, kutatás-fejlesztési feladatokban hasznosította és hasznosítja. A következőkben néhány példát hozok az általam koordinált tervezés, szakértői munka és kutatás-fejlesztés tárgyát képező, „növekvő cirkulációra” tervezett, egyenes illetve előrenyilazott lapátozású axiális ventilátorokra. E gépek közül bizonyos ventilátorok prototípusa megvalósult, mások egyedi gyártást követően beépítve üzemelnek, illetve kereskedelmi forgalomban is elérhetőek. A példák: fokozott fajlagos teljesítményű, jó hatásfokú ipari szellőzők; nagy vetőtávolságú, jó hatásfokú sugárventilátorok; mérsékelt zajkibocsátású villamos motor-hűtő ventilátorok; füstgázelszívó ventilátorcsalád; kiterjedt üzemállapot-tartományban működő szélcsatorna-ventilátor.



A fenti eseti alkalmazásokon túlmenően a hosszú távú cél: CFD alapú, algoritmizált, széles alkalmazási körű lapátrács-tervezési és optimalizálási eljárás kidolgozása, a forgógép kutatás-fejlesztés korszerű trendjének megfelelően. Az eljárás – az eddigi eredményekre építve – a „növekvő cirkulációra” tervezésnek és a lapátfelfűzési vonal-alak célszerű megválasztásának kombinációján alapul. Az optimalizálási eljárás kezdeti lépéseként kiindulási geometriai változatokat dolgozunk ki, a tézispontokban szereplő kvalitatív irányelvek, kvantitatív támpontok, és előtervezési módszer felhasználásával. E megoldásváltozatokból kiindulva, optimalizációs algoritmus végzi el a lapátcirkuláció-eloszlás, a lapátfelfűzés, az elemi lapátrács-geometria célirányos összehangolását.

A fentiekkel párhuzamosan további célkitűzés: az aerodinamikai és zajkeltési mechanizmusok összefüggéseinek felkutatása fokozott terhelésű axiális átömlésű lapátrácsokban. Kiemelten vizsgálándóak azon áramlási jelenségek, amelyek a „növekvő cirkulációra” tervezéshez kötődően zajforrásként léphetnek fel, és amelyek zajának csökkentését a radiálistól eltérő lapátfelfűzéstől várhatjuk. E jelenségek, többek között: a lapátok kilépő éléről leúszó örvények; megvastagodott határréteg a szívott lapátoldalon; a lapátcsúcs közelében felgyülemelő, légrés-áramlást befolyásoló határréteg-közeg. A zajcsökkentésre vonatkozó irányvonalakat kívánatos beépíteni a korábban vázolt lapátrács-tervezési és optimalizálási eljárásba.

A lapátrács-tervezési és optimalizálási eljárást részben nemzetközi együttműködésben tervezzük megvalósítani és hasznosítani. A nemzetközi kapcsolatépítés fontos eleme, hogy az axiálgép-kutatással kapcsolatos eredményeinket széles körben közreadtuk nívós fórumokon és szakirodalmi kiadványokban, beleértve az impakt faktorral rendelkező, Science Citation Index által jegyzett folyóiratokat. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációink belga, brit, dél-koreai, francia, indiai, japán, kanadai, kínai, magyar, német, olasz, osztrák, spanyol, svéd, szlovén kutatóhelyek valamint ipari vállalatok munkatársai részéről kaptak független hivatkozásokat.

Az axiálgépes kutatómunka és a hozzá kötődő ipari tevékenység eredményeit beépítettem az általam kidolgozott és oktatott, áramlástechnikai gépekkel, ipari légtechnikával és áramlástan mérés technikával foglalkozó, magyar és angol nyelvű, B.Sc., M.Sc., és Ph.D. tantárgyakba. Az axiális átömlésű forgógépekkel kapcsolatos szakértői és kutatási tevékenységbe a témavezetésemmel tudományos diákköri, demonstrátor, szakdolgozat-készítő, diplomatervező diákok, valamint doktoranduszok kapcsolódtak be. Munkájuk színvonalának köszönhetően mindannyian társszerzőként szerepelnek a publikációkban. A radiálistól eltérő lapátfelfűzésű axiálgépek témájában vezetésemmel egy Ph.D. fokozat született, egy további doktoráns védeése a közeljövőben várható.

## 5. A t  z  f  zetben hivatkozott v  logatott f  ggetlen szakirodalom

- [I] Corsini, A., Rispoli, F. (2004), Using sweep to extend the stall-free operational range in axial fan rotors. *Proc. Instn Mech. Engrs, Part A, J. Power and Energy*, **218**, pp. 129-139.
- [II] Ramakrishna, P. V., Govardhan, M. (2011), On loading corrections and loss distributions in low-speed forward swept axial compressor rotors. *Proc. Instn Mech. Engrs, Part A, J. Power and Energy*, **225**, pp. 120-130.
- [III] Lakshminarayana, B. (1996), *Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [IV] Khalid, S. A., Khalsa, A. S., Waitz, I. A., Tan, C. S., Greitzer, E. M., Cumpsty, N. A., Adamczyk, J. J., Marble, F. E. (1999), Endwall blockage in axial compressors. *ASME J. Turbomachinery*, **121**, pp. 499-509.
- [V] McNulty, G. S., Decker, J. J., Beacher, B. F., Khalid, S. A. (2003), The impact of forward swept rotors on tip-limited low-speed axial compressors. *ASME Paper No. GT2003-38837*.
- [VI] Yamaguchi, N., Tominaga, T., Hattori, S., Mitsuhashi, T. (1991), Secondary-loss reduction by forward-skewing of axial compressor rotor blading. *Yokohama International Gas Turbine Congress, Yokohama, Proceedings* pp. II.61-II.68.
- [VII] Gallimore, S. J., Bolger, J. J., Cumpsty, N. A., Taylor, M. J., Wright, P. I., Place, J. M. M. (2002), The use of sweep and dihedral in multistage axial flow compressor blading – Parts I and II. *ASME J. Turbomachinery*, **124**, pp. 521-541.
- [VIII] Carolus, T. (2003), *Ventilatoren*. B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden.
- [IX] Cros, S., Carbonneau, X. (2009), Computational study of the aerodynamic impact of stall margin improvements in a high tip speed fan. *Proc. 8th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics (ETC'08)*, Graz, Proceedings pp. 401-410.
- [X] Gifford, N. L., Savory, E., Martinuzzi, R. J. (2007), Experimental study of automotive cooling fan aerodynamics. *SAE Paper No. 2007-01-1525*.
- [XI] Idel'cik, I. E. (2008), *Handbook of Hydraulic Resistance*. Jaico Publishing House, Delhi. (3rd Edition, 6th Jaico Impression).
- [XII] Helming, K. (1996), Numerical analysis of sweep effects in shrouded propfan rotors. *J. Propulsion and Power*, **12**, pp. 139-145.
- [XIII] Horlock, J. H., Denton, J. D. (2005), A review of some early design practice using computational fluid dynamics and a current perspective. *ASME J. Turbomachinery*, **127**, pp. 5-13.

- [XIV] Rossetti, A., Ardizzon, G., Pavesi, G., Cavazzini, G. (2010), An optimum design procedure for an aerodynamic radial diffuser with incompressible flow at different Reynolds numbers. *Proc. Instn Mech. Engrs, Part A, J. Power and Energy*, **224**, pp. 69-84.
- [XV] Templalexis, I., Pilidis, P., Pachidis, V., Kotsiopoulos, P. (2011), Development of a two-dimensional streamline curvature code. *ASME J. Turbomachinery*, **133**, pp. 011003-1 to 011003-7.

## 6. A tézispontokhoz kötődő saját tudományos közlemények

- [1] Vad, J. (2006), Analytical modeling of radial fluid migration in the boundary layer of axial flow turbomachinery blades. *Proc. 2006 ASME TURBO EXPO*, Barcelona, Spain, ASME Paper GT2006-90523 (CD-ROM) (ISBN 0-7918-3774-2), Vol. 6, Pts. A and B, pp. 261-270.
- [2] Vad, J., Bencze, F. (1998), Three-dimensional flow in axial flow fans of non-free vortex design. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **19**, pp. 601-607.
- [3] Vad, J., Horváth, Cs. (2008), The impact of the vortex design method on the stall behavior of axial flow fan and compressor rotors. *Proc. 2008 ASME TURBO EXPO*, Berlin, Germany, ASME Paper GT2008-50333 (CD-ROM) (ISBN 0-7918-3824-2)
- [4] Vad, J. (2004), Effects of sweep and spanwise changing circulation applied to airfoils: a case study. *Journal of Computational and Applied Mechanics*, **5**, (2), pp. 383-400.
- [5] Corsini, A., Rispoli, F., Vad, J., Bencze, F. (1999), Concerted experimental and numerical studies on axial flow fan rotor aerodynamics. *Proc. 3rd European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics (ETC'99)*, London, United Kingdom, pp. 519-531.
- [6] Vad, J., Bencze, F., Corsini, A., Rispoli, F. (2001), Non-free vortex flow effects in an axial flow rotor. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering Series*, **45**(2), pp. 201-216.
- [7] Vad, J., Bencze, F., Glas, W., Jaberg, H., Benigni, H. (2002), Comparative investigation on axial flow pump rotors of free vortex and non-free vortex design. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering Series*, **46**(2), pp. 107-116.
- [8] Vad, J., Bencze, F., Corsini, A., Rispoli, F. (2000), Design aspects of three-dimensional flow in high performance axial flow ventilating fans. *Progress in Modern Ventilation, Proc. 6<sup>th</sup> International Symposium on Ventilation for Contaminant Control (VENTILATION'2000)*, Helsinki, Finland, Vol. 1, pp. 108-110.

- [9] Vad, J. (2001), Incorporation of forward blade sweep in the non-free vortex design method of axial flow turbomachinery rotors. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering Series*, **45**(2), pp. 217-237.
- [10] Corsini, A., Rispoli, F., Vad, J., Bencze, F. (2001), Effects of blade sweep in a high performance axial flow rotor. *Proc. 4th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics (ETC'01)*, Florence, Italy, pp. 63-76.
- [11] Vad, J. (2002), Iterative design of high performance axial flow rotors with forward-swept blades. *Proc. GÉPÉSZET'2002 Konferencia (Conference on Mechanical Engineering)*, Budapest, Hungary, Vol. 2, pp. 679-683.
- [12] Vad, J., Corsini, A. (2002), Comparative investigation on axial flow industrial fans of high specific performance with unswept and forward swept blades at design and off-design conditions. *Proc. 9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC-9)*, Honolulu, Hawaii, USA. Log. No. FD-ABS-016. CD-ROM. Proc. Abstracts p. 301.
- [13] Corsini, A., Rispoli, F., Vad, J. (2003), Iterative design of axial flow fans of high specific performance with swept blades. *Proc. 5th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics (ETC'03)*, Prague, Czech Republic, pp. 245-256.
- [14] Van den Braembussche, R. A., Vad, J. (2004), Challenges in optimisation of axial flow turbomachinery blades for 3D flow, including sweep and dihedral effects. In: Vad, J., Lajos, T., Schilling, R. (Szerk.), *Modelling Fluid Flow - State of the Art*, Springer Verlag Heidelberg, pp. 99-103.
- [15] Vad, J. (2008), Aerodynamic effects of blade sweep and skew in low-speed axial flow rotors at the design flow rate: an overview. *Proc. Instn Mech. Engrs, Part A, J. Power and Energy*, **222**, pp. 69-85.
- [16] Vad, J. (2010), Radial fluid migration and endwall blockage in axial flow rotors. *Proc. Instn Mech. Engrs, Part A, J. Power and Energy*, **224**, pp. 399-417.
- [17] Vad, J. (2011), Correlation of flow path length to total pressure loss in diffuser flows. *Proc. Instn Mech. Engrs, Part A, J. Power and Energy*, **225**, pp. 481-496.